Расчет электрических характеристик многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги

Инж. Д. С. ВАРШАВСКИЙ

Усть-Каменогорское отделение Института энергетики АН Казахской ССР

Многослойный диэлектрик из пропитанной конденсаторной бумаги используется в ряде типов электрических конденсаторов и в первую очередь силовых.

Электрические свойства бумажного конденсатора определялись экспериментально и лишь за последнее время появились сообщения [Л. 1 и 2] о методике расчета некоторых из них. В настоящей статье описывается методика расчета основных электрических характеристик многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги. Расчет электрических свойств конденсаторной бумаги производят на основе простейших эквивалентных схем [Л. 3], полагая при этом, что относительный объем X, занимаемый порами в бумаге, равен:

$$X = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_к}, \qquad (1)$$

где γ — плотность непропитанной конденсаторной бумаги;

$\gamma_к$ — плотность клетчатки.

Исходя из двухемкостной последовательной эквивалентной схемы конденсаторной бумаги, для ее диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ получены следующие выражения [Л. 3]:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к}{1 - X + X\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п}}; \qquad (2)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_к}{1 + \frac{\varepsilon_к X}{\varepsilon_п (1-X)}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п (1-X)}{\varepsilon_к X}}. \qquad (3)$$

Здесь и в дальнейшем индекс «к» относится к клетчатке, а «п»—к пропитывающему веществу.

Структура многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги характеризуется последовательным чередованием листов пропитанной бумаги и зазоров между ними, заполненных пропитывающим веществом. О содержании зазоров в диэлектрике можно судить по так называемому коэффициенту запрессовки K, который принимают равным:

$$K = \frac{d_р}{d_ф} = \frac{d_р}{d_р + d_м}; \qquad (4)$$

$$d_р = n d_б; \qquad (5)$$

$$d_ф = d_р + d_м, \qquad (5)$$

где $d_р$ — расчетная суммарная толщина диэлектрика;

$d_ф$ — фактическая суммарная толщина диэлектрика;

$d_б$ — толщина одного листа бумаги;

$d_м$ — суммарная толщина зазоров между листами конденсаторной бумаги;

n — количество листов бумаги между обкладками.

Наиболее удобно расчеты сводить к расчетной толщине диэлектрика, которой пользуются в заводской практике. Исходя из этого, реальный многослойный диэлектрик из пропитанной конденсаторной бумаги можно заменить двухъемкостной последовательной эквивалентной схемой, по которой относительный объем X', занимаемый порами внутри конденсаторной бумаги и зазорами между ее листами, будет:

$$X' = 1 - \frac{K\gamma}{\gamma_к}. \qquad (7)$$

Тогда для диэлектрической проницаемости диэлектрика имеем:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к}{\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} - K\frac{\gamma}{\gamma_к}\left(\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} - 1\right)}. \qquad (8)$$

Необходимые для расчета ε по равенству (8) значения γ и $\varepsilon_п$ легко определяются опытным путем. Для плотности клетчатки найдено значение $\gamma_к \approx 1{,}55$ *г/см*³ [Л. 3]; $\varepsilon_к$ находят косвенными способами.

Величина $\varepsilon_к$ определялась нами на высушенных непропитанных образцах конденсаторов, изготовленных из разной бумаги. Коэффициент запрессовки образцов устанавливался от 0,8 до 1. Значение этого коэффициента, а также других параметров образцов строго контролировалось.

По емкости образцов определялась ε бумажного непропитанного диэлектрика, на основе которой вычислялась $\varepsilon_к$ по формуле:

$$\varepsilon_к = \frac{\varepsilon\frac{K\gamma}{\gamma_к}}{1 - \varepsilon\left(1 - \frac{K\gamma}{\gamma_к}\right)}. \qquad (9)$$

Выражение (9) получается из (8) путем несложных преобразований для случая $\varepsilon_п = 1$. Полученные таким образом величины $\varepsilon_к$ для трех разных бумаг приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изготовитель бумаги	Плотность бумаги, *г/см*³	Толщина бумаги, *мк*	Коэффициент запрессовки K	ε	$\varepsilon_к$
Успенская фабрика . .	1,0	12	0,9	1,97	6,5
Фабрика «Красный курсант»	0,88	12	0,8	1,58	5,3
То же	0,88	12	0,9	1,7	5,2
Импортная бумага . . .	1,32	10	0,845	2,43	5,5
То же	1,32	10	1,0	3,3	5,5

Данные табл. 1 получены для диэлектрика из трех листов конденсаторной бумаги между обкладками и относятся к температуре 20° С и частоте 50 *гц*.

Для каждого значения коэффициента запрессовки было изготовлено по 144 секции конденса-

торов серии КМВ-II. Для подсчета ε принималась суммарная емкость всех секций с данной величиной K.

Значение $\varepsilon_к=6{,}5$, полученное для бумаги Успенской фабрики, использовалось в последующих расчетах для всей отечественной бумаги сортов КОН-I и КОН-II. Для бумаги опытной выработки плотностью $\gamma=0{,}88$ *г/см*³ принято среднее значение $\varepsilon_к=5{,}25$.

Результаты расчета ε на основе равенства (8) для бумажно-масляного диэлектрика из бумаги разной плотности приведены в табл. 2. Расчет произведен для конденсаторного масла, имеющего при температуре 20° С и частоте 50 *гц* проницаемость $\varepsilon_п=2{,}2$.

Таблица 2

Плотность бумаги, *г/см*³	Коэффициент запрессовки K		
	0,8	0,9	0,98
	Расчетная величина диэлектрической проницаемости ε бумажно-масляного диэлектрика для $\varepsilon_п=2{,}2$		
0,88	2,94	3,11	3,26
1,0	3,34	3,57	3,76
1,2	3,73	4,08	4,43
1,32	3,72	4,06	4,4

Опытные величины ε, полученные на трехслойных секциях конденсаторов серии КМВ-II, приведены в табл. 3.

Для каждого коэффициента запрессовки из данной партии бумаги изготовлялось по 360 секций. При изготовлении образцов величина коэффициента запрессовки строго контролировалась. Опытная величина ε определялась на основе суммарной емкости всех секций с данными коэффициентами запрессовки.

Сопоставление опытных и расчетных зависимостей ε от коэффициента запрессовки приведено на рис. 1, из которого видно, что расчетные данные удовлетворительно согласуются с опытными.

Разброс опытных точек для бумаги КОН-I и КОН-II вызван в первую очередь колебанием плотности отдельных партий бумаги, которое

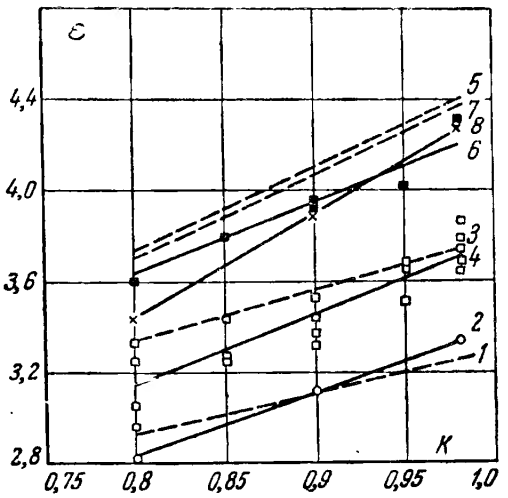

Рис. 1. Влияние коэффициента запрессовки K на диэлектрическую проницаемость ε трехслойного диэлектрика из пропитанной конденсаторным маслом ($\varepsilon_п=2{,}2$) конденсаторной бумаги.

Сплошные кривые — опыт; пунктирные — расчет.

1 и *2*—$\gamma=0{,}83$ *г/см*³; *3* и *4*—КОН-I; *5* и *6*—КОН-II; *7* и *8*—$\gamma=1{,}32$ *г/см*³.

в исследованных партиях бумаги составляло примерно 6%, что допускается ГОСТ 1908-57.

Можно полагать, что величины $\varepsilon_к$ для бумаги различных фабрик не обязательно будут совпадать. Следовательно, для более точных расчетов целесообразно предварительно определять $\varepsilon_к$ для конденсаторной бумаги данного изготовителя.

Что касается выражения для тангенса угла потерь многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги, то с учетом равенства (7) оно принимает следующий вид:

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{\operatorname{tg}\delta_к}{1+\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п}\left(\frac{\gamma_к-K\gamma}{K\gamma}\right)}+\frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1+\frac{\varepsilon_п}{\varepsilon_к}\left(\frac{K\gamma}{\gamma_к-K\gamma}\right)}. \qquad (10)$$

Таблица 3

Изготовитель бумаги	Сорт бумаги или плотность, *г/см*³	Толщина бумаги, *мк*	Коэффициент запрессовки K				
			0,8	0,85	0,9	0,95	0,98
			Опытная величина диэлектрической проницаемости				
Малинская фабрика	КОН-I	10	—	3,28	3,32	3,52	3,65
Успенская фабрика	КОН-I	12	3,34	3,44	3,53	3,69	3,74
То же	КОН-I	12	2,96	—	3,37	—	3,77
Фабрика «Красный Курсант»	КОН-I	12	3,25	—	3,45	—	3,68
То же	КОН-I	12	3,16	3,25	3,45	3,67	3,87
Малинская фабрика	КОН-II	12	3,61	—	—	—	—
То же	КОН-II	12	3,64	—	—	—	—
То же	КОН-II	12	—	—	3,93	—	—
То же	КОН-II	12	—	—	3,96	—	—
То же	КОН-II	12	—	—	—	—	4,3
То же	КОН-II	10	—	3,8	—	4,15	—
Фабрика «Красный Курсант»	0,88	12	2,84	—	3,13	—	3,4
То же	1,32	10	3,46	—	3,93	—	4,32
Импортная бумага							

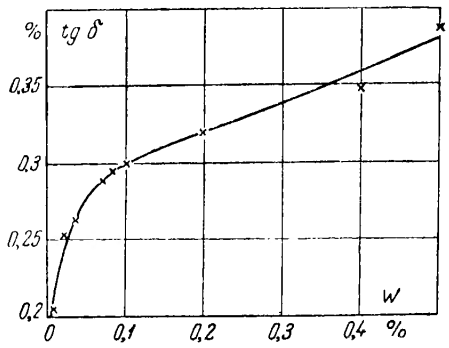

Рис. 2. Влияние остаточного влагосодержания в конденсаторной бумаге W на $\operatorname{tg}\delta$ высоковольтных бумажно-масляных конденсаторов серии КМВ-II.

При этом предполагается, что приложенное напряжение не превышает начального напряжения ионизации.

Выражение (10) не учитывает влияние остаточной влажности на величину $\operatorname{tg}\delta$. Между тем, как видно из данных рис. 2, незначительное влагосодержание в бумаге оказывает существенное влияние на $\operatorname{tg}\delta$. Поэтому при пользовании выражением (10) необходимо вводить соответствующие поправки в величину $\operatorname{tg}\delta_к$. Зависимость $\operatorname{tg}\delta_к$ от остаточного влагосодержания конденсаторной бумаги приведена на рис. 3.

Во многих практических случаях более удобно учитывать влияние остаточного влагосодержания в бумаге следующим образом. Как известно, многослойный диэлектрик из пропитанной конденсаторной бумаги предварительно высушивается для максимально возможного удаления влаги. Остаточное влагосодержание в бумаге зависит от продолжительности, а также температуры и остаточного давления в процессе сушки. Обычно сушка проводится при температуре 120° С. Продолжительность сушки обычно принимается такой, чтобы в высушиваемом диэлектрике установилось равновесное влагосодержание, соответствующее применяемому остаточному давлению в конце сушки при данной температуре.

В таких условиях удобно пользоваться опытными зависимостями $\operatorname{tg}\delta_к$ от остаточного давления в процессе сушки при данной температуре. Здесь подразумевается, что сушка при данной температуре и данном остаточном давлении доведена до конца, т. е. до равновесного остаточного

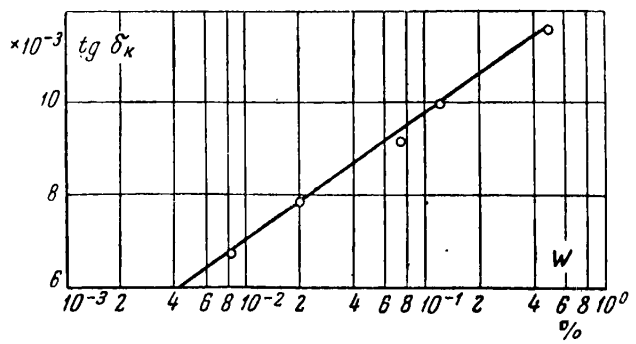

Рис. 3. Влияние остаточного влагосодержания в конденсаторной бумаге W на $\operatorname{tg}\delta_к$.

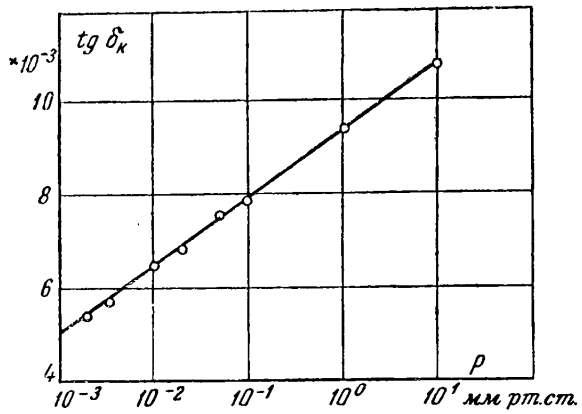

Рис. 4. Влияние остаточного давления p в процессе сушки при температуре 120° С на величину $\operatorname{tg}\delta_к$, соответствующую равновесному остаточному влагосодержанию в бумаге при данных условиях.

влагосодержания, соответствующего данным условиям сушки. Полученная для этих условий зависимость показана на рис. 4 [Л. 4]. Здесь $\operatorname{tg}\delta_к$ соответствует равновесному остаточному влагосодержанию в конце сушки при температуре 120° С и остаточных давлениях p. Данные рис. 4 получены для бумаги Успенской бумажной фабрики производства 1959 г. и относятся к температуре 20° С и частоте 50 *гц*.

В общем виде зависимость $\operatorname{tg}\delta_к$ от p можно выразить эмпирической формулой:

$$\operatorname{tg}\delta_к = \operatorname{tg}\delta_{к0} + K_1 \lg(K_0 p), \qquad (11)$$

где p — остаточное давление при вакуумной сушке;
$\operatorname{tg}\delta_{к0}$; K_1 и K_0 — постоянные.

Для зависимости $\operatorname{tg}\delta_к$ от p, представленной на рис. 4, имеем $\operatorname{tg}\delta_{к0} = 50 \cdot 10^{-4}$; $K_1 = 14{,}85 \cdot 10^{-4}$; $K_0 = 10^3$.

С учетом (11) выражение (10) принимает следующий вид:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_{к0} + K_1 \lg(K_0 p)}{1 + \frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п}\left(\frac{\gamma_к - K\gamma}{K\gamma}\right)} + \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п}{\varepsilon_к}\left(\frac{K\gamma}{\gamma_к - K\gamma}\right)}. \qquad (12)$$

Выражение (12) проще рекомендуемого в [Л. 2] для тангенса угла потерь бумажно-масляных конденсаторов, которое к тому же не отражает зависимости $\operatorname{tg}\delta_к$ от степени сушки.

Данные измерения $\operatorname{tg}\delta$ бумажно-масляного диэлектрика приведены в табл. 4 и на рис. 5.

Опытные данные получены на трехслойных образцах. Величина $\operatorname{tg}\delta$ измерялась при напряжении 380 *в* частотой 50 *гц* при температуре 20° С. Образцы проходили сушку под вакуумом при температуре 120° С.

Зависимости *1—6* на рис. 5 относятся к $p = 0{,}1$ *мм рт. ст.*, *7—8* — к $p = 0{,}01$ *мм рт. ст.*

Таблица 4

Изготовитель бумаги	γ, г/см³	$\operatorname{tg}\delta_{\text{п}}\cdot10^{-4}$	$\varepsilon_{\text{п}}$	Коэффициент запрессовки 0,8	0,95	0,9	0,95	0,98
				$\operatorname{tg}\delta\cdot10^{-4}$				
Опытные данные								
Фабрика «Красный курсант»	0,88	2	0,1	22	—	25	—	27
Успенская фабрика	1,0	2	0,1	28	—	30	—	33
Импортная бумага	1,32	7	0,1	45	—	49	—	53
То же	1,32	9	0,01	—	—	43	46	47,5
Малинская фабрика	1,0	5	0,01	19	20,5	22,5	25	29
Расчетные данные								
	0,88	2	0,1	22,01	—	25,8	—	28,8
	1,0	2	0,1	26,2	—	30	—	33,3
	1,32	7	0,1	41	—	48,3	—	55,8
	1,32	9	0,01	34,8	—	41	—	46,5
	1,0	5	0,01	20,04	—	23,26	—	26,04

Зависимости *1* и *2* на рис. 5 относятся к $\gamma=0{,}88$ *г/см*³, *3*, *4*, *7* и *8* — к $\gamma=1$ *г/см*³, а *5*, *6*, *9* и *10* — к $\gamma=1{,}32$ *г/см*³.

Из данных табл. 4 и рис. 5 видно, что расчетные данные удовлетворительно согласуются с опытными.

Последовательной эквивалентной схемой можно также воспользоваться для оценки влияния некоторых факторов на уровень кратковременной электрической прочности многослойного диэлектрика из пропитанной бумаги.

На основе такой схемы, исходя из представления о последовательном пробое конденсаторной бумаги, для ее электрической прочности на переменном токе получено следующее выражение [Л. 3]:

$$E_{\text{пр}}=\frac{U_{\text{пр.п}}}{d}\left[1+\frac{\varepsilon_{\text{п}}\gamma}{\varepsilon_{\text{к}}(\gamma_{\text{к}}-\gamma)}\right], \qquad (13)$$

где d — толщина бумаги, *мк*;

$U_{\text{пр.п}}$ — пробивное напряжение пропитывающего вещества, находящегося в порах.

Аналогично предыдущему для расчетной величины электрической прочности многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги с учетом (7) получаем:

$$E_{\text{пр}}=\frac{U_{\text{пр.п}}}{d_{\text{р}}}\left[1+\frac{\varepsilon_{\text{п}}K\gamma}{\varepsilon_{\text{к}}(\gamma_{\text{к}}-K\gamma)}\right], \qquad (14)$$

где $U_{\text{пр.п}}$ — пробивное напряжение пропитывающего вещества, находящегося в порах конденсаторной бумаги и зазорах между ее листами.

Пробивное напряжение пропитывающего вещества, находящегося в порах бумаги, не зависит от коэффициента запрессовки. Пробивное напряжение пропитывающего вещества в зазоре определяется толщиной прослойки в наиболее узкой части. Вследствие неравномерности бумаги по толщине повышение коэффициента запрессовки в области обычно используемых величин от 0,85 до 0,95 приводит не к снижению толщины наиболее узкой части зазора, а к увеличению количества такого рода узких мест. Изменение коэффициента запрессовки здесь вызывает лишь

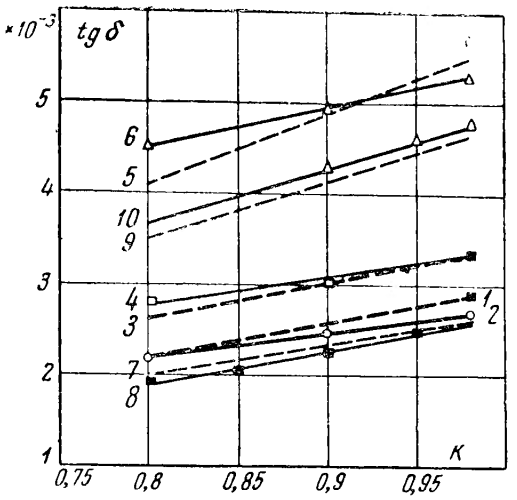

Рис. 5. Влияние коэффициента запрессовки K на $\operatorname{tg}\delta$ трехслойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги.

изменение средней толщины зазоров между отдельными листами конденсаторной бумаги.

По нашему мнению, в этих условиях можно допустить, что $U_{\text{пр.п}}$ слабо зависит от K. Пренебрегая изменением $U_{\text{пр.п}}$ при разных K, для сравнительной оценки изменения расчетного уровня кратковременной электрической прочности получаем:

$$\frac{E_{\text{пр.р.к}'}}{E_{\text{пр.р.к}''}}=\frac{\left[\frac{\varepsilon_{\text{к}}\gamma_{\text{к}}}{\gamma(\varepsilon_{\text{к}}-\varepsilon_{\text{п}})}-K'\right]\left(\frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma}-K''\right)}{\left[\frac{\varepsilon_{\text{к}}\gamma_{\text{к}}}{\gamma(\varepsilon_{\text{к}}-\varepsilon_{\text{п}})}-K''\right]\left(\frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma}-K'\right)}. \qquad (15)$$

Это выражение не учитывает влияния ряда факторов.

Однако на практике обычно представляет интерес оценить влияние коэффициента запрессовки на однотипный диэлектрик. При этом сравниваются диэлектрики одинакового качества и толщины. В этих условиях возможно пользоваться выражением (15) для сравнительной оценки влияния K при прочих равных условиях.

Из выражения (15) видно, что кратковременная электрическая прочность многослойного бумажного диэлектрика должна увеличиваться с ростом K (степени сжатия диэлектрика).

Опыты по исследованию влияния степени сжатия многослойного бумажно-масляного диэлектрика на его кратковременную электрическую прочность были проведены Федченко [Л. 5], который показал, что увеличение степени сжатия приводит к увеличению кратковременной электрической прочности многослойного бумажно-масляного диэлектрика. Одновременно было обнаружено, что, начиная с определенного давления, при прессовке могут иметь место случаи снижения пробивного напряжения.

Причиной этого является чисто механическое повреждение части диэлектрика между обкладками. Для устранения механических повреждений диэлектрика в наших исследованиях применялась длительная предварительная подпрессов-

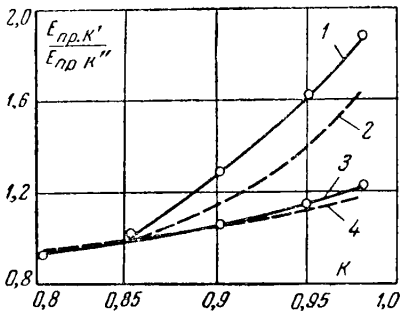

Рис. 6. Влияние коэффициента запрессовки K на уровень кратковременной электрической прочности трехслойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги.

ка при малых удельных давлениях. В таких условиях было изготовлено 50 образцов с разными коэффициентами запрессовки. Каждый образец состоял из 72 секций конденсаторов серии КМВ-II с тремя листами бумаги между обкладками. Секции в каждом образце соединялись параллельно через индивидуальные секционные предохранители. Площадь одной обкладки в секции равнялась 300 *дм*^{2}.

Исследование кратковременной электрической прочности образцов производилось по методике [Л. 6], основанной на сравнении напряженностей электрического поля, соответствующих данному проценту пробоя секций.

Полученные таким образом опытные данные, характеризующие влияние коэффициента запрессовки на уровень кратковременной электрической прочности трехслойного диэлектрика, приведены на рис. 6. Кривая *1* получена для диэлектрика из трех слоев конденсаторной бумаги между обкладками толщиной 10 *мк* и плотностью $\gamma = 1{,}33$ *г/см*^{3}. Пропитка конденсаторным маслом с $\varepsilon_п = 2{,}2$ при 20° С и 50 *гц*.

Кривая *3* получена для диэлектрика из трех слоев конденсаторной бумаги толщиной 12 *мк* и плотностью 1 *см*^{3}. Пропитка соволом с $\varepsilon_п = 5$, при 20° С и 50 *гц*.

Обе кривые получены для отношения напряженностей электрического поля, соответствующих пробою 3% общего количества секций. Для пропитанного маслом диэлектрика при $K = 0{,}85$ это составляло 40 *кв/мм*, а соволом — 30 *кв/мм*.

Соответствующие этим данным расчетные кривые показаны на рис. 6 пунктиром. Кривая *2* соответствует бумажно-масляному, а кривая *4* — бумажно-соволовому диэлектрику.

Из рис. 6 видно, что совпадение опытных данных с расчетными оказалось достаточно удовлетворительным.

Из выражения (15) и данных опыта следует, что упрочнение диэлектрика с увеличением K будет тем большим, чем выше плотность конденсаторной бумаги.

Выводы. 1. На основе использования эквивалентных схем получены выражения для расчета и оценки основных электрических характеристик многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги.

2. Полученные выражения подтверждаются опытными данными и могут применяться при расчетах.

Литература

1. Багалей Ю. В., Расчет емкости пропитанных конденсаторов, «Изв. высших учебных заведений» («Электромеханика»), 1958, № 6, стр. 161.

2. Назаров Н. И. и Переселенцев И. Ф., Влияние коэффициента запрессовки на электрические характеристики бумажно-масляного конденсатора, «Вестник электропромышленности», 1960, № 6, стр. 55.

3. Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959.

4. Варшавский Д. С., К расчету диэлектрических потерь в многослойном диэлектрике из пропитанной конденсаторной бумаги, «Изв. высших учебных заведений» («Электромеханика»), 1961, № 1.

5. Федченко И. К., Зависимость пробивного напряжения пропитанной маслом бумаги от степени сжатия, «Вестник электропромышленности», 1940, № 7.

6. Варшавский Д. С., Метод оценки электрической прочности тонкослойного диэлектрика силовых конденсаторов, «Изв. высших учебных заведений» («Энергетика»), 1960, № 9.

[21.3.1961]

◇ ◇ ◇